

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

**KATEDRA TECHNOLOGIÍ A MĚŘENÍ**

## **BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Dvoufázové kompozity s polymerní reaktoplastickou  
matricí určené pro elektroizolační prvky a jejich  
vybrané fyzikálně-mechanické a dielektrické vlastnosti**

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická

Akademický rok: 2016/2017

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: Vít BOŠKA  
Osobní číslo: E13B0104P  
Studijní program: B2612 Elektrotechnika a informatika  
Studijní obor: Komerční elektrotechnika  
Název tématu: Dvoufázové kompozity s polymerní reaktoplastickou maticí určené pro elektroizolační prvky a jejich vybrané fyzikálně-mechanické a dielektrické vlastnosti  
Zadávající katedra: Katedra technologií a měření

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

1. Proveďte základní kategorizaci kompozitů dle použité matrice a dispergované fáze.
2. Dále se zaměřte pouze na charakterizaci dvoufázových kompozitů s polymerní reaktoplastickou maticí a na aplikaci těchto kompozitů v elektroizolačních systémech.
3. Proveďte rešerši reaktoplastů využívaných v těchto kompozitech pro výrobu matrice.
4. Proveďte rešerši materiálů pro dispergovanou fázi se zaměřením na vláknové struktury a jejich formování.
5. Realizujte měření vybraného materiálu (např. vláknového kompozitu určeného pro výrobu desek plošných spojů) s využitím dielektrické spektroskopie. Pro stejný materiál realizujte měření vybraných fyzikálně-mechanických vlastností (např. hustoty a rázové houževnatosti).

Rozsah grafických prací: podle doporučení vedoucího

Rozsah kvalifikační práce: 30 - 40 stran

Forma zpracování bakalářské práce: tištěná/elektronická

Seznam odborné literatury:

1. F. CARDARELLI. Materials handbook: A Concise Desktop Reference. 2. vyd. London: Springer, 2008, 1339 s. ISBN 978-184-6286-698.
2. D. R. ASKELAND a P. P. FULAY. Essentials of materials science and engineering. 2. vyd., SI ed. United States: Cengage Learning, 2010, xx, 604 s. ISBN 978-049-5438-502.
3. G. W. EHRENSTEIN. Polymerní kompozitní materiály. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009, 351 s. ISBN 978-80-86960-29-6.
4. A. K. KAW. Mechanics of composite materials. 2. vyd. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006, 466 s. Mechanical engineering series, v. 29. ISBN 978-084-9313-431.
5. elektronické informační zdroje (SUMMON - vyhledávací nástroj knihovny ZČU, případně přímo Science Direct, IEEE Explore atd.)

Vedoucí bakalářské práce:

Ing. Petr Kadlec

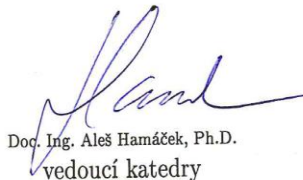
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání bakalářské práce: 15. října 2015

Termín odevzdání bakalářské práce: 8. června 2017

  
Doc. Ing. Jiří Hammerbauer, Ph.D.  
děkan



  
Doc. Ing. Aleš Hamáček, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Plzni dne 14. října 2016

## **Abstrakt**

Předkládaná bakalářská práce je zaměřena v první části na kompozitní materiály a jejich dělení podle druhu matrice a dispergované fáze, blíže pak popisuje vláknové kompozity s polymerní reaktoplastickou maticí, dělení podle použitých vláken a přibližuje také výrobu těchto vláken. Dále je uvedeno využití jejich elektroizolačních vlastností v elektrických strojích a přístrojích, také použití kompozitů jako desek pro plošné spoje a kompozitů využitých pro výrobu izolátorů. Druhá část je experimentální a zabývá se měřením několika zkušebních vzorků. Měřeny byly fyzikální a mechanické vlastnosti jako hustota, tvrdost a rázová houževnatost, kde byla podstatná energie potřebná k přeražení zkušebních vzorků. Měřením dielektrických vlastností za pomoci širokopásmové dielektrické spektroskopie byly získány frekvenční a teplotní závislosti reálné a imaginární složky komplexní relativní permitivity, které byly následně vyhodnoceny.

## **Klíčová slova**

Kompozitní materiál, dispergovaná fáze, matrice, vláknové kompozity, polymery, epoxidová pryskyřice, skleněné vlákno, hustota, rázová houževnatost, tvrdost, dielektrická spektroskopie, permitivita.

## **Abstract**

This Bachelor's thesis focuses on the composite materials and their division according to the type of matrix and dispersed phase in the first part. Attention is paid to fiber composites with the polymeric reactoplastic matrix, according to the separation of the fibers and also production of these fibers. Furthermore, the use of the electrical insulating properties is discussed in relation to electrical machines and devices, and also their use as the plates for printed circuits and composites used for the manufacture of insulators. The second part is experimental and deals with the measurement of several samples. The physical and mechanical properties measured are: density, impact strength, where was the energy needed to break the testing samples and hardness too. The measurement of dielectric properties resulted in obtaining values of complex permittivity using broadband dielectric spectroscopy.

## **Key words**

Composite materials, dispersed phase, matrix, fiber composites, polymers, epoxide resin, fiberglass, density, impact strength, hardness, dielectric spectroscopy, permittivity.

## Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této bakalářské/diplomové práce, je legální.

.....  
podpis

V Plzni dne 6.6.2017

Vít Boška

## **Poděkování**

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Ing. Petru Kadlecovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce. Také bych rád poděkoval mé rodině za podporu během celého studia.

Dále bych rád poděkoval Ministerstvu školství, mládeže a tělovýchovy ČR, že tato práce mohla vzniknout díky jejich podpoře v rámci projektu RICE – Nové technologie a koncepce pro inteligentní systémy, číslo projektu LO1607.

## Obsah

<b>ÚVOD .....</b>	<b>9</b>
<b>SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK .....</b>	<b>10</b>
<b>1 ZÁKLADNÍ TEORIE KOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ A JEJICH DĚLENÍ .....</b>	<b>11</b>
1.1 DĚLENÍ DLE TVARU DISPERGOVANÉ FÁZE .....	12
1.2 DĚLENÍ DLE POUŽITÉ MATRICE .....	13
1.2.1 <i>Kompozity s kovovou matricí</i> .....	13
1.2.2 <i>Kompozity s keramickou matricí</i> .....	14
1.2.3 <i>Kompozity s polymerní matricí</i> .....	15
<b>2 VYUŽITÍ V ELEKTROIZOLAČNÍCH SYSTÉMECH .....</b>	<b>17</b>
2.1 KOMPOZITY JAKO DESKY PRO PLOŠNÉ SPOJE .....	18
2.2 KOMPOZITY JAKO IZOLÁTORY .....	19
2.3 KOMPOZITY PRO ELEKTRICKÁ ZAŘÍZENÍ.....	19
2.3.1 <i>Nizkonapěťové izolační systémy elektrických točivých strojů</i> .....	20
2.3.2 <i>Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů</i> .....	20
<b>3 DVOUFÁZOVÉ KOMPOZITY S REAKTOPLASTICKOU MATRICÍ .....</b>	<b>21</b>
3.1 DRUHY REAKTOPLASTICKÝCH MATRIC .....	21
3.1.1 <i>Polyesterové pryskyřice</i> .....	22
3.1.2 <i>Vinylesterové pryskyřice</i> .....	23
3.1.3 <i>Epoxidové pryskyřice</i> .....	24
3.1.4 <i>Fenolické pryskyřice</i> .....	25
3.2 MODIFIKACE A VYTVRZOVÁNÍ REAKTOPLASTICKÝCH MATRIC .....	26
<b>4 VLÁKNOVÉ KOMPOZITY S REAKTOPLASTICKOU MATRICÍ.....</b>	<b>28</b>
4.1 DRUHY VYZTUŽUJÍCÍCH VLÁKEN.....	28
4.1.1 <i>Skleněná vlákna</i> .....	28
4.1.2 <i>Aramidová vlákna</i> .....	30
4.1.3 <i>Uhlíková vlákna</i> .....	30
<b>5 EXPERIMENTÁLNÍ ČÁST .....</b>	<b>32</b>
5.1 MĚŘENÍ DIELEKTRICKÝCH VLASTNOSTÍ .....	32
5.2 MĚŘENÍ FYZIKÁLNĚ-MECHANICKÝCH VLASTNOSTÍ.....	36
5.2.1 <i>Rázová houževnatost</i> .....	36
5.2.2 <i>Tvrдость</i> .....	38
5.2.3 <i>Hustota</i> .....	40
<b>ZÁVĚR .....</b>	<b>42</b>
<b>SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ .....</b>	<b>1</b>



## Úvod

Tato práce pojednává o kompozitních materiálech, o jejich dělení a o jejich širokém průmyslovém využití. Kompozitní materiály neboli kompozity se stále více využívají a můžeme se s nimi setkat v běžném životě v mnoha aplikacích. Jejich použití posunuje hranice dříve používaných jednofázových materiálů, které měli vlastnosti jasně dané jedinou fází. U vícefázových kompozitů využíváme vlastnosti obou fází. V posledních desetiletích se tyto materiály a technologie, které se dříve využívaly pouze pro strategické využití, jako kosmonautika nebo vojenský průmysl, objevují čím dál častěji. Jejich vyšší cena je vyvážena skvělými fyzikálně-mechanickými vlastnostmi. Existují však také kompozity s nízkou pořizovací cenou, například základový materiál pro desky plošných spojů. Průmyslová výroba umělých kompozitů byla inspirována přírodou, kde je u různorodých materiálů celkem běžné využívání synergického efektu jednotlivých složek pro dosažení lepších vlastností (např. v případě dřeva).

Kompozitního materiálu lze docílit spojením dvou složek s navzájem zcela rozdílnými vlastnostmi. Snahou je využít v kompozitu od každé ze složek její pozitivní vlastnosti a tak docílit výsledku, kdy dohromady kompozit složený ze dvou fází bude mít lepší vlastnosti než každá samostatná fáze. Tento jev se nazývá synergický efekt a je tím větší, čím více je pozitivních vlastností v kompozitu využito. Kompozity mohou být několikafázové, minimálně však dvou. Jsou složeny z matrice a dispergované fáze. Jako matrice se používá řada materiálů. Jejím úkolem v tomto systému je především zaručení požadovaného geometrického tvaru, pevnosti, tuhosti kompozitu a ochrany dispergované fáze. Dispergovaná fáze je ve většině případů odlišná od matrice, dodává kompozitu zcela jiné vlastnosti a je nesčetně druhů, se kterými se v praxi lze setkat. Velkou výhodou je tedy využití potřebných vlastností, které jsou u kompozitu vyšší než by byly sečtené vlastnosti jednotlivých složek, což se ukázalo jako velice efektivní a ekonomické.

Kompozitní materiály nacházejí uplatnění v současnosti v mnoha různých oblastech. Tato práce se zaměřuje především na jejich využití v elektroizolačních systémech, kde jsou velkým přínosem díky jejich výborným vlastnostem, jako například vysoké pevnosti, korozivzdornosti a odolnosti proti chemikáliím. Tyto vlastnosti se liší vzhledem k použitým fázím v kompozitu. Cílem této práce je rešerše využívaných matric a výztuží, používaných v těchto systémech a také měření jejich fyzikálně – mechanických a dielektrických vlastností.

## Seznam symbolů a zkratk

$T_g$	[°C]	Teplota skelného přechodu
$R_m$	[MPa]	Pevnost v tahu
$R_p$	[MPa]	Pevnost v tlaku
$\varepsilon$	[F . m <sup>-1</sup> ]	Komplexní permitivita
$\varepsilon_r$	[-]	Relativní permitivita
$\varepsilon_0$	[F . m <sup>-1</sup> ]	Permitivita vakua
$tg \delta$	[-]	Ztrátový činitel
$Z$	[Ω]	Impedance
$\omega$	[rad . s <sup>-1</sup> ]	Úhlová rychlost
$C$	[F]	Kapacita
$C_0$	[F]	Kapacita prázdného kondenzátoru
$W$	[J]	Energie
$a$	[J . mm <sup>-2</sup> ]	Rázová houževnatost
$\sigma$	[-]	Směrodatná odchylka
$h$	[mm]	Tloušťka vzorku
$b$	[mm]	Šířka vzorku
$S$	[mm <sup>2</sup> ]	Průřez
$\lambda$	[m]	Vlnová délka
$\rho$	[g . cm <sup>-3</sup> ]	Hustota
$m1$	[g]	Hmotnost vzorku ve vzduchu
$m2$	[g]	Hmotnost vzorku v kapalině
MMC		Kompozity s kovovou matricí (Metal matrix composites)
CMC		Kompozity s keramickou matricí (Ceramic matrix composites)
PMC		Kompozity s polymerní matricí (Polymer matrix composites)
PE		Polyetylen
DPS		Desky plošných spojů
VPI		Vakuově tlaková impregnace (Vacuum pressure impregnation)
EP – R		Epoxidová pryskyřice
UP – R		Polyesterová pryskyřice
VE – R		Vinylchloridová pryskyřice
VEU – R		Vinylesteruretanové pryskyřice
PFA – R		Fenalkrylátová pryskyřice
MA – R		Metakrylátová pryskyřice
BDMA		Benzyl dimethylamin
UV		Ultrafialové záření
UVA		Ultrafialové záření dlouhovlnné
UVB		Ultrafialové záření středovlnné
UVC		Ultrafialové záření krátkovlnné

## 1 Základní teorie kompozitních materiálů a jejich dělení

*"Za technický materiál vhodný pro moderní zařízení považujeme jedolitou pevnou látku o určitém objemu a tvaru, která musí být spojitá a mít ve všech směrech stejné vlastnosti – být homogenní"*[3]. Postupem času materiály prodělaly evoluci, kdy díky znalostem a zkušenostem lidstvo vytvářelo stále nové k životu potřebné typy s různými vlastnostmi, pro různé okruhy využití. Vývojem se zjistilo, že výroba homogenního materiálu s ideálními vlastnostmi by byla vysoce neekonomická. Proto se začaly používat kompozitní materiály, které lze charakterizovat jako heterogenní a které jsou ekonomicky výhodnější, protože jsou navrhovány pro specifická použití, čímž dochází k maximálnímu využití hmoty. Z počátku se tyto materiály (označované zkráceně také jako kompozity) používaly výhradně v technických a vojenských oblastech, avšak po druhé světové válce došlo k mnohem širšímu využití po celém světě. Nyní se tyto materiály využívají téměř všude v leteckém, automobilovém, lodním, a stavebním průmyslu. V leteckém průmyslu nacházejí kompozity uplatnění například při výrobě křídel, přístrojových a palubních panelů i samotného trupu letadel. Je vhodné zmínit i lékařský průmysl, kde se využívají polymery jako implantáty, a v neposlední řadě také v elektrotechnickém průmyslu převážně jako izolační vícefázové materiály nebo jako konstrukční materiály k sestavení mnoha zařízení. Mimo umělé kompozity, které jsou využívány především kvůli zlepšeným mechanickým vlastnostem, existují také přírodní verze těchto materiálů. Například řez bambusového stonku lze strukturně srovnat s řezem epoxidové pryskyřice vyztužené uhlíkovými vlákny. Dalším zástupcem přírodních kompozitů může být kost, která je tvořena organickými vlákny, malými organickými krystaly, vodou a tuky.[1 - 4]

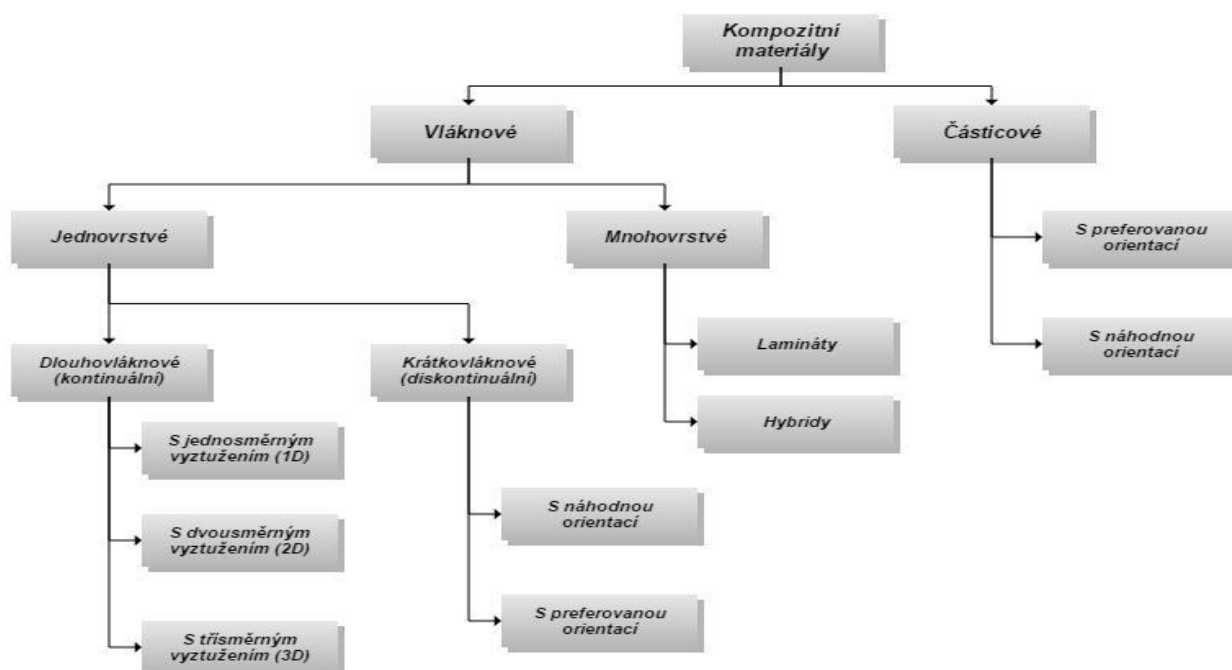
Pod pojmem kompozitní materiál lze rozumět materiál, který se skládá ze dvou či více chemicky a fyzikálně odlišných složek neboli fází. Výsledné vlastnosti takového materiálu nemá sama o sobě ani jedna z jeho složek. Takové materiály pak získávají díky synergickému efektu v mnoha ohledech výjimečné vlastnosti oproti vlastnostem jednotlivých fází. Kompozitní materiál se skládá ze zpevňující fáze (vlákna nebo částice) a z matrice, která slouží především jako pojivo zpevňujících fází, kterých může kompozitní materiál obsahovat více, minimálně však jednu. Jednotlivé složky musí obsahovat z celkového materiálu minimálně 5 % [1] a musí se od sebe svými vlastnostmi výrazně lišit. Výztuž je na rozdíl od matrice většinou pevnější a tužší, přičemž matrice má

především funkci pojiva výztuže. Podle těchto podmínek nelze tedy za kompozit považovat například plast, který obsahuje malé množství tuhých barviv. Ani slitina, která má dvoufázovou strukturu vznikající tuhnutím z homogenní taveniny nebo následným tepelným zpracováním solidu, není klasifikována jako kompozit.[1 - 4]

Dále lze kompozitní materiály dělit podle mnoha různých kritérií. Jedním z nich je dělení podle počtu fází, kdy se můžeme nejčastěji setkat se dvou nebo třífázovými kompozity. Další dělení je podle použité matrice, je známo mnoho různých typů, kdy se jako matrice používá kov, keramika nebo polymerní materiály. Kompozity jsou také děleny podle dispergované fáze, na kompozity zpevněné částicemi a zpevněné vlákny. Další možností jak rozlišit jednotlivé druhy je například dělení podle velikosti dispergované fáze.[1 - 4]

### 1.1 Dělení dle tvaru dispergované fáze

V první řadě je nutno zmínit rozdělení kompozitních materiálů podle zpevňující složky, respektive fáze, případně fází, které dodávají kompozitu jeho pevnost a tuhost - tedy na kompozity zpevněné vlákny a zpevněné částicemi, jak je uvedeno na Obr. 1. Kompozity zpevněné částicemi lze rozlišit především podle tvaru jednotlivých částic a to na výztuž s částicemi pravidelnými, či nepravidelnými, dále pak zda je rozložení a



Obr. 1: Dělení kompozitů dle použité dispergované fáze.(převzato z: [14])

orientace částic nahodilá či nikoliv. Materiály, které jsou vyztuženy vlákny se zpravidla dělí na jednovrstvé, které nesou dvě podskupiny a to dlouhovláknové a krátkovláknové a mnohovrstvé, které se pak ještě dělí - na lamináty a hybridní kompozity. [1, 3, 5]

Materiály ve formě vláken se cíleně jako konstrukční prvky používají výjimečně, avšak v kompaktní formě, jako je tomu právě u kompozitů, se stávají zajímavou skupinou materiálů. Vlákna dodávají konečnému materiálu především vysokou měrnou pevnost, případně tuhost. Lze je dělit podle typu vyztužujících vláken. Mezi nejpoužívanější vlákna patří:[5]

- Skleněná vlákna – nejpoužívanější jsou bezalkalické skloviny jako vynikající elektrický izolant, které mají vysokou propustnost záření (označované také jako E – vlákna).
- Aramidová vlákna – z vyztužovacích vláken mají nejmenší hmotnost, z čehož vyplývá vysoká měrná pevnost v tahu.
- Uhlíková vlákna – technická vlákna s velmi vysokou pevností a tuhostí. Nevýhodou je jejich nízká tažnost.

## 1.2 Dělení dle použité matrice

Spojité fáze, neboli matrice, je nedílnou součástí kompozitního materiálu. Zajišťuje soudržnost kompozitu jako jednoho celku. Na výrobu matic, se používají zejména termoreaktivní pryskyřice, jako například epoxidová, polyesterová, fenolformaldehydová a další, které jsou dále vyztuženy především vlákny nebo částicemi. Dále existují matrice kovové a keramické.[3]

### 1.2.1 Kompozity s kovovou matricí

V šedesátých letech bylo použito borových a křemičitých vláken ke zpevnování lehkých kovů, zvláště hliníkových slitin. Většina kompozitů s kovovou matricí (Metal matrix composites – MMC) jsou ještě ve vývoji a nejsou tak široce využívány jako kompozity s polymerní matricí, ač mají některé přednosti ve svých vlastnostech, především mají lepší vlastnosti při vysokých teplotách, menší teplotní roztažnost, vyšší odolnost proti otěru. Tyto výhody jsou bohužel kompenzovány vyšší cenou a hlavně složitou technologií výroby. Zejména žáruvzdorné vlastnosti u kompozitů s kovovou

matricí, zpevněných keramickými vlákny vykazují velice dobré vlastnosti. Obchodních kompozitů s kovovou matricí je na trhu mnoho, mezi nejrozšířenější patří například hliník zpevněný částicemi – Tyto kompozity jsou nejrozšířenější v dopravní sféře a časté hliníkové matrice představují téměř všechny jeho možné slitiny (licí, tvářecí, vytvrditelné i nevytvrditelné). Výhodou u některých hliníkových kompozitů je možnost jejich tepelného zpracování. Ke spojování těchto kompozitů je příhodné difúzní a třecí svařování.[1, 2, 5]

Kompozity s kovovou matricí se dají vyrábět mnoha různými způsoby. Tyto metody lze rozdělit do několika kategorií:[1]

- V pevném stavu
- V tekutém stavu
- Depozice - spočívá v atomizaci taveniny a zavádění zpevňovacích částic ve sprše jemných kovových kapiček. Kov a zpevňovací částice jsou pak deponovány na substrátu
- „in situ“ – indukčním ohřátím se dosáhne jednosměrného tuhnutí – nejsou to pravé kompozity

### 1.2.2 Kompozity s keramickou matricí

Kompozity s keramickou matricí (Ceramic matrix composites – CMC) se vyrábějí především za účelem zlepšení houževnatosti, otěruvzdornosti a teplotní odolnosti v extrémních podmínkách, dále pak pro zvýšení pevnosti v tahu a potlačení závislosti keramické matrice na druhu namáhání a na rozměrech součástí. Mezi výhody těchto kompozitů patří hlavně velká pevnost při vysokých teplotách, malá hustota a odolnost vůči oxidaci. Jejich nevýhodou oproti ostatním kompozitům je především nutnost jejich zpracování při velice vysokých teplotách a rozdíly v koeficientu tepelné roztažnosti matrice a dispergované fáze. Většinou je snaha o zvýšení houževnatosti keramické matrice. Toho je možné docílit buď použitím částicové disperze s vyšší lomovou houževnatostí než má samotná matrice nebo použitím nespojitých vláken s vyšší pevností než matrice. Taková vlákna však musí být při porušení matrice vytažena z matrice ven, což představuje značnou energii. Vhodná jsou proto vlákna s Youngovým modulem, jehož hodnota je podobná jako hodnota Youngova modulu matrice.[1, 3, 5]

Jak je již zmíněno v předchozím odstavci, největší problém keramiky je její křehkost, pro kterou se keramika stává hůře použitelnou v mnoha aplikacích. Technická keramika má převážně strukturu krystalickou s vazbou kovalentní, iontovou nebo smíšenou, je křehká a pevná. Sama o sobě se vyrábí například práškovou metalurgií, což je lisování prášku a pojiva [3]. Pro výrobu keramických kompozitů se jako dispergovaná fáze používá velká řada zpevňovadel. Podle nich se dále mohou keramické kompozity dělit na kompozity s výztuží v podobě částic - krátkých či dlouhých vláken a vláken z uhlíku. U částicové výztuže je nejčastěji používána matrice SiC, přičemž častokrát s přebytkem Si, kvůli vyšší pevnosti, takové kompozity jsou například využívány pro rakety a raketové motory. Do SiC matrice jsou při běžné technologii na výrobu keramiky, například vodní suspenze (břečka), přidány částice extrémně tvrdého  $TiB_2$ . Tato kombinace dává konečnému materiálu maximální odolnost proti otěru, typicky se tento druh používá na trysky tryskajících strojů. Zpevnění whiskery (monokrystaly), kdy matrice je keramika  $Al_2O_3$  nebo  $ZrO_2$  a whiskery většinou SiO, má své výhody i nevýhody [3, 4]. Kompozit je za normálních i vysokých teplot pevný v tahu i tlaku. Samotné whiskery zlepšují odolnost creepu (tečení), odolnost proti korozi a snižují koeficient tření. Výroba probíhá klasickým způsobem, například vodní suspenzí s přidávkou whiskerů. Největší nevýhodou je vysoká cena whiskerů a také jejich možná toxicita. Další zpevnění je možné krátkými vlákny, kdy dochází ke zvýšení lomové houževnatosti a snížení creepu. Do běžných keramických matic z oxidové nebo neoxidové keramiky se přidávají disperze z krátkých vláken jako SiC,  $Al_2O_3$ , Si-Ti-O-C,  $Si_3N_4$  a dalších. Pro výrobu dlouhoválných keramických kompozitů se nejčastěji využívá procesu tzv. infiltrace keramické břečky do vláknové rohože následovaný výpalem keramiky. Z toho vyplývá, že vlákna nesmí při výpalu keramiky znatelně degradovat. Obecně pro výrobu keramických kompozitů je možné využít jakoukoli keramiku, je však vhodné volit výztuž i maticí z podobného materiálu, což vede k minimalizaci vnitřního pnutí.[3, 4]

### 1.2.3 Kompozity s polymerní maticí

Kompozity s polymerní maticí (Polymer matrix composites – PMC) patří mezi syntetické. Dnes jsou nejrozšířenější v elektrotechnické oblasti, především jsou využívány na izolační systémy. K hlavním výhodám patří například jejich výborné mechanické vlastnosti. Oproti kompozitům s kovovou maticí jsou odolné vůči korozi a mají nižší měrnou hmotnost při zachování vysoké pevnosti. K hlavním nevýhodám patří jejich nízké maximální pracovní teploty, vysoké koeficienty tepelné roztažnosti, s tím úzce související

rozměrová nestabilita a také citlivost na radiaci a vlhkost. Absorpce vody z prostředí může mít škodlivé vlivy, které pak zhoršují mechanické vlastnosti. Avšak volbou správného materiálu, lze tyto nevýhody částečně eliminovat, například polymery vyztužené uhlíkovými vlákny mají velmi nízký koeficient tepelné roztažnosti a epoxidy jsou odolné proti radiaci.[1, 3, 6, 7]

Na výrobu matric se používají termoplasty i reaktoplasty. Termoplasty na rozdíl od reaktoplastů netvoří pevné křížové spojení, naopak reaktoplasty vytvářejí tuhou síť a tak snesou vyšší teploty. Vazba tvořící řetězce u termoplastů je slabá van der Waalsova, a proto tečou při zvýšených teplotách, to je také důsledkem, že tři čtvrtiny všech polymerových matric jsou reaktoplasty. Jejich tuhost je zvýšena díky nahrazení van der Waalsovy vazby silnými křížovými spoji. Mají také lepší creepové vlastnosti a jsou odolnější vůči chemickým vlivům. K výrobě těchto kompozitů se nejčastěji používají termoreaktivní pryskyřice (epoxidové, polyesterové, fenolformaldehydové), což jsou pryskyřice, které se zřetelně spojují za tepla a tlaku, nebo přidáním katalyzátoru. Nejčastěji bývají vyztuženy papírem, vlákny (sklo, uhlík) nebo tkaninami (bavlna). Kompozity lze vyrábět s různě modifikovanými vlastnostmi podle použití v praxi. Největší pevnosti se dosahovalo při použití skleněných a uhlíkových vláken. V nedávné době se také rozšířilo využívání nových ztužovacích materiálů s velmi dobrými vlastnostmi. Zejména Kevlar, který má velice vysokou pevnost v tahu. Oproti skleněným vláknům má výrazně menší hustotu a projevuje největší odpor proti šíření trhlin, má také nejlepší odolnost proti rázovému namáhání a nejlépe tlumí vibrace. Jeho nevýhodou je nízká pevnost v tlaku, využívá se v kombinaci s pryžemi, reaktoplastickými pryskyřicemi a epoxidy s nimiž má nejlepší soudržnost.[1, 2]



## 2 Využití v elektroizolačních systémech

Na kompozitní materiály využívané jako izolace působí během jejich životnosti řada faktorů a různé druhy namáhání. Ideální izolační materiál by i během těchto nepříznivých podmínek neměl změnit vlastnosti, které se od něho očekávají (vysoká elektrická pevnost, co nejvyšší rezistivita, minimální relativní permitivita a malé dielektrické ztráty). Bohužel nikdy nelze dosáhnout ideálního materiálu a tak pro správný chod elektrického zařízení, jsou velice důležité pracovní podmínky. Je třeba proto zvolit takový materiál, jehož vlastnosti jsou dostatečně stálé v závislosti na provozních podmínkách pro danou aplikaci.[10]

Důležitým faktorem je rychlost stárnutí, respektive životnost izolačních materiálů el. strojů a přístrojů, tento proces téměř vždy doprovází zhoršování elektrických i mechanických vlastností. Stárnutí je definováno jako výskyt nevratných a škodlivých změn v izolačních materiálech nebo systémech, jež ovlivňují jejich schopnost podat požadující výkon v důsledku působení jednoho nebo více ovlivňujících faktorů [26]. Velice důležitým faktorem je teplota. Zde je třeba rozlišovat dlouhodobé stárnutí v provozních teplotách a stárnutí náhlým výkyvem teploty. Teplota je také důvodem vzniku teplotních tříd izolantů, což je označení elektroizolačních materiálů nebo systémů, které se číselně rovnají maximální teplotě použití. Tab. 1 uvádí maximální možnou pracovní teplotu izolantů.[10]

Tab. 1: Teplotní třídy izolantů[10]

<b>Teplotní třída [°C]</b>	70	90	105	120	130	155	180	200	220
<b>Označení</b>		Y	A	E	B	F	H		

V elektrotechnice se kompozity využívají v hojném počtu hlavně pro jejich skvělé vlastnosti. Ty se samozřejmě mění v závislosti na počtu a vlastnostech jednotlivých použitých fázích. V praxi se můžeme setkat s kompozity dvoufázovými, jako například Textit, pro který je typická bavlněná tkanina jako výztuž. Takové kompozity se lisují za zvýšené teploty a vyznačují se výbornou elektrickou a mechanickou pevností. Dále kartit, který má jako výztuž celulózový papír a stejně jako předchozí Textit se vyrábí lisováním za zvýšených teplot. Posledním větším odvětvím je Sklotextit. Jak je již z názvu patrné,

jedná se o kombinaci skla a textilu, respektive jde o speciálně upravenou skelnou tkaninu. Tyto tři podskupiny vrstvených materiálů jsou od výrobců k dostání se pod mnoha názvy za různé ceny. V Tab. 2 je porovnání několika desek s různými výztužemi.[14, 23, 24]

Tab. 2: Vybrané dvoufázové kompozity využívané v elektrotechnice [23,24]

	Výztuž	Pryskyřice	$R_m$ [MPa]	$R_p$ kolmo na vrstvy [MPa]	$R_p$ rovnoběžně s vrstvami [MPa]	$E_p$ v oleji při 90 °C kolmo na vrstvy [kV]
<b>Kartit</b>	papír	fenolová	120	300	100	25
<b>Textit</b>	bavlněná tkanina	fenolová	80	-	120	1,5
<b>Sklotextit</b>	skleněná tkanina	epoxidová	300	350	180	30

## 2.1 Kompozity jako desky pro plošné spoje

Kompozity se používají jako izolační materiály v mnoha oblastech. Jsou například nedílnou součástí při výrobě desek pro plošné spoje, protože tvoří nosnou podložku, která slouží pro montáž součástek. Výběr správného materiálu na nosnou podložku je velice důležitý, je vystaven během své životnosti mnoha okolním vlivům – pracovním teplotám, mechanickému namáhání, apod. Proto musíme zvolit vhodný materiál, který je důležitý pro spolehlivost celého výrobku. Desky pro plošné spoje mohou být různé, podle potřeby pevné, odolné vůči vysokým teplotám – cca 290 °C (skleněná tkanina impregnovaná polyamidovou pryskyřicí), korozivzdorné, odolné proti chemikáliím, ale mohou být například i ohebné. Zpravidla se desky skládají z organických pryskyřic, které jsou vyztuženy například skleněnými vlákny nebo celulózovým papírem. Při použití reaktoplastických pryskyřic současně vyztužených vhodnou dispergovanou fází dosáhneme neohebné, velice pevné, vysokým teplotám odolné izolační nosné podložky.[10]

Nejpoužívanější DPS jsou označovány zkratkami FR, což v původním znění znamená Flame Resistant [27], v překladu ohnivzdorný, respektive samozhášivý. Nejvyužívanější jsou FR2, FR3 a FR4. FR2 a FR3 jsou vyztužené celulózovým papírem a pojivo tvoří fenolická pryskyřice, tyto desky jsou méně pevné v porovnání s FR4 a tak u nich snáze dochází k prohybu, mimo jiné jsou také navlhavější. Již zmíněná FR4 je pevnější, má tedy lepší mechanické vlastnosti. Problémem však může být rozměrová nestabilita, která se projevuje hlavně u náročnějších operací při osazování elektronických

součástí. Tento typ desek je velice používaný pro jednostranné, oboustranné ale i vícevrstvé DPS, kde plní funkci tzv. listů, nebo-li prepregů. Prepreg může mít termoplastickou i reaktoplastickou polovytvrzenou matrici a jako výztuž skelnou tkaninu nebo rohož. Prepreg také můžeme označit jako předimpregnovanou tkaninu, jejíž doporučená skladovací teplota je  $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ . Důvodem těchto skladovacích podmínek je polovytvrzená matrice. Například polovytvrzená pryskyřice ve stavu rezitou (tzv. stav B), kdy již vzniklo zesítnění molekul, ale má zatím velmi malou hustotu je ve stavu lepivého gelu, proto je doporučeno ji skladovat v chladicích boxech s teplotami pod bodem mrazu. Tyto prepregy mají dvě důležité funkce, za prvé tvoří hlavní surovinu na výrobu materiálů v této skupině a také slouží jako dielektrikum u vícevrstevných DPS.[25, 28]

## 2.2 Kompozity jako izolátory

Desky plošných spojů (DPS) ale nejsou jediným okruhem využití dvoufázových kompozitů. Jejich výhodné vlastnosti se využívají také při výrobě izolátorů na stožárech vysokého napětí, kde výztuž tvoří orientovaná vlákna, která jsou prosycena reaktoplastickou pryskyřicí (polyesterovou nebo epoxidovou). Mají několik zásadních výhod oproti často používaným keramickým izolátorům:[10]

- Lepší odolnost proti mechanickým rázům
- Značně menší hmotnost a s tím úzce spojenou snadnější dopravu a montáž
- Vyšší odolnost ve znečištěných a slaných prostředích (na kompozit je nanášen plášť ze silikonu)

## 2.3 Kompozity pro elektrická zařízení

Další kompozity lze nalézt v izolačních systémech elektrických strojů, kde rostou jejich využití, mimo jiné se v elektrických zařízeních používají také na výrobu a součástí. Nejvíce se zde uplatňují tříslložkové kompozity, které se skládají z nosné složky, pojiva ve funkci matrice a dielektrické bariéry. Každá z těchto složek hraje důležitou roli výsledného materiálu. Nosná složka zajišťuje mechanické vlastnosti, nejčastěji se využívá tkanina (bavlněná, skleněná, polyetylnaftálová), papír nebo polyesterové rouno. Dále pojivo, které má za úkol dokonalé propojení všech složek a také na něm závisí výsledná teplotní třída kompozitního materiálu, zde se nejvíce používají pryskyřice (epoxidová, polyesterová, silikonová). Poslední a nedílnou součástí je dielektrická bariéra, ta zajišťuje výslednou elektrickou pevnost materiálů, nejčastěji je to slídový papír. Dále se tříslložkové kompozity

využívají při výrobě ohnivzdorných pásek, na ovíjení speciálních kabelů. Jejich velkou předností je funkčnost i po shoření plastového obalu. [10]

### **2.3.1 Nízkonapěťové izolační systémy elektrických točivých strojů**

Tyto systémy jsou zpravidla tvořeny izolací vodičů, vyložení drážek, které chrání samotnou izolaci vodiče před poškozením o stěnu drážky a impregnantem. Postupně se provádí všechny tři operace pro dokonalou izolaci. Nejprve nastává izolování vodiče, většinou omotávání, ovíjení bavlnou nebo skleněnými vlákny, možné je také vytvořit izolaci pomocí laku. Následuje vyložení drážky, zpravidla lepenkou. Poté impregnace, která u nízkonapěťových systémů obvykle probíhá máčením, zapalováním nebo zakapáváním, přičemž každá z operací má svá specifika a využívá se u ní různých látek. Liší se také rozdílnými vytvrzovacími procesy.[11]

### **2.3.2 Vysokonapěťové izolační systémy točivých elektrických strojů**

Tyto izolační systémy se vytvářejí dvěma způsoby. První se nazývá Resin-rich, což je v podstatě tříšložkový kompozit dodávaný jako polotovar s vysokým obsahem pojiva (až 40% [11]). Takto dodaný materiál se zpracovává přímo na vodivých částech. V případě vinutí, vytvoří izolační trubku kolem vodiče o požadované tloušťce, které se pak vkládají přímo do drážek stroje. Tento způsob izolace má dobré vlastnosti zejména pak elektrickou pevnost. Druhým způsobem je systém VPI (Vacuum Pressure Impregnation), který má název podle výrobní operace, tedy vakuově tlakové impregnace. Jako základní materiál je použita savá slídová páska, které je při impregnačním procesu prosycena impregnantem. Jako impregnant nejčastěji pryskyřice (epoxidová, polyesterová nebo silikonová), které disponují dobrými elektrickými i mechanickými vlastnostmi a relativně krátkou vytvrzovací dobou. Samotný impregnační proces má několik částí a je časově i technicky velice náročný.[11]

U obou zmíněných způsobů izolace lze nalézt klady i zápory. Resin-rich je jednoznačně levnější a technicky méně náročná operace, ovšem je zapotřebí přesných přípravků pro správné vytvrzení. VPI má naproti tomu výhodu v používání bezropouštědlových pryskyřic, takže je velice šetrná k životnímu prostředí. Na druhou stranu u VPI je většinou celé vinutí proimpregnováno jako celek, takže zde prakticky neexistuje možnost opravy jednotlivých částí. Zvolit tedy ideální technologii je individuální záležitost a záleží na mnoha faktorech.[11]

### 3 Dvoufázové kompozity s reaktoplastickou maticí

U popisovaných dvoufázových kompozitů je první fáze reaktoplastická matrice, kterou je prosycen systém výztuže, neboli dispergované fáze tak, že po zpracování vznikne tvarově stálý výrobek. Úkolem matrice je především zaručení požadovaného tvaru výrobku a vzájemné polohy výztuže (například vláken), zavedení a přenos sil a ochrana výztuže před okolními vlivy. Druhá fáze je dispergovaná a na rozdíl od matrice dodává konečnému výrobku hlavně pevnost a tuhost. Tři čtvrtiny všech polymerních matic jsou reaktoplasty, známé také pod názvy – termosety nebo duroplasty. [1, 8, 9]

#### 3.1 Druhy reaktoplastických matic

Jak již bylo uvedeno, tak tři čtvrtiny všech polymerních matic tvoří reaktoplasty. Původně se pro kompozity používaly pouze vyztužené nenasycené polyesterové (UP – R) nebo epoxidové pryskyřice (EP – R). Nyní se škála druhů pryskyřic používaných jako matrice značně rozšířila, více v následujících odstavcích. Avšak nejpoužívanější pryskyřice jsou stále dvě výše zmíněné a tvoří většinu kompozitních aplikací i dnes. Polyesterové pryskyřice jsou levnější, ale oproti epoxidovým si nedokážou udržet své vlastnosti při vysokých teplotách. Epoxidové pryskyřice jsou také viskóznější a mají účinnější zpracování. Tyto reaktivní pryskyřice mají tu přednost, že jsou ve výchozím stavu nízkomolekulární a většinou při normální teplotě v tekutém stavu. Při zpracování ve formě taveniny, je jejich viskozita nižší než u termoplastů, proto jsou levnější na zpracování, lépe smáčejí a snadněji prosycují vlákna. To vede na celkové levnější zpracování, protože vlákna lze pryskyřicí prosycovat při mnohem nižších teplotách než u termoplastů. Nejdůležitější typy reaktoplastických matic jsou tyto reaktivní pryskyřice:[8]

- Nenasycené polyesterové pryskyřice (UP – R)
- Vinylesterové (VE – R) nebo Fenalkrylátové pryskyřice (PFA – R)
- Epoxidové pryskyřice (EP – R)
- Fenolické pryskyřice
- Metakrylátové pryskyřice (MA – R)
- Izokyanátové pryskyřice

Důležitými látkami při výrobě kompozitů jsou často přidávaná tvrdidla a urychlovače. Tvrdidla jsou sloučeniny, které katalyticky spouštějí polymerizaci MA – R, UP – R a VE – R pryskyřic, případně ovlivňují vytvrzování v průběhu polyadice u

pryskyřic epoxidových nebo izokyanátových. Další přidávané látky zvané urychlovače urychlují síťovací reakci a jsou většinou přidávány v malém množství.[8, 9]

### 3.1.1 Polyesterové pryskyřice

Nenasycené polyesterové pryskyřice patří k nejpoužívanějším reaktoplastickým pryskyřicím. Jsou to slabě nažloutlé roztoky, u kterých nevznikají těkavé vedlejší produkty při jejich vytvrzování. Vytvrzují se za normálních až mírně zvýšených teplot a při této činnosti dochází k uvolňování reakčního tepla a k objemovému smrštění o 5 % – 9 % [8], k němuž dochází společným působením chemické reakce a tepelného ochlazení. Pryskyřice je zhotovena reakcí dvou funkčních složek, polypropylenglykonu a kyseliny ftalonové, kumaronové, maleinové nebo anhydridu (ftalanhydridu nebo maleianhydridu). Poté je vzniklý předpolymer rozpuštěn zpravidla v styrenu, reaktivním rozpouštědle, který současně působí při vytvrzování jako kopolymerační monomer (kopolymerace je polymerace dvou a více monomerů). Rozpouštědlem nemusí být vždy styren, existují i nenasycené polyesterové pryskyřice rozpuštěné v některém z methakrylátu. Vytvrzují se radikálovým mechanismem, mají nízkou viskozitu, dobře smáčejí vlákna, poměrně rychle vytvrzují a také vzhledem k jejich úměrně nízké ceně jsou z velké části používaným materiálem pro kompozity.[8, 15, 16]

Velkou výhodou polyesterových pryskyřic (UP – R) je možnost použití na všechny technologie. To proto, že viskozitu pryskyřice určuje podíl reaktivního rozpouštědla, převážně styrenu. Podle potřeby tak lze udělat viskóznější (menší podíl rozpouštědla) nebo méně viskózní přidáním většího množství reaktivního rozpouštědla. Nevýhodou pak při menší viskozitě je celková menší pevnost a teplotní odolnost již vytvrzelé pryskyřice. Zpravidla se pohybuje obsah rozpouštědla v rozmezí 30 % – 50 %.[8]

Existuje několik druhů polyesterových pryskyřic:[8]

- ortoftalová – nejlevnější, vysoká chemická odolnost
- izoftalová – základem pro kvalitní kompozit odolný proti hydrolýze, dražší a kvalitnější než orthoftalová
- fumarová – dobrá tepelná i chemická odolnost
- chlorftalová
- tereftalová

Kromě viskozity, kterou lze ovlivnit (v určitých mezích) přidáním rozpouštědla, je možné, v případě potřeby, měnit ve velkém rozsahu u pryskyřice zpracovatelnost i její vlastnosti. Jak výběrem výchozího materiálu, tak také pomocí přísad. Tyto přísady zvyšují viskozitu a tím ovlivňují zpracovatelnost a prosycování výztuže. Mimo jiné slouží jako objemové plnivo a zlevňující materiál. Jako přísady se používají nejčastěji křída, kaolin a hydroxid hlinitý, který snižuje především hořlavost. Dále přísady snižují objemové smrštění a součinitel teplotní roztažnosti. Vlastnosti polyesterové pryskyřice lze měnit kromě přísad také změnou chemické struktury a přidáním aditiv.[8, 15]

UP – R se vytvrzují radikálovou kopolymerací dvojných vazeb v pryskyřici s dvojnými vazbami molekuly styrenu. Rychlost vytvrzování lze ovlivnit, může trvat několik minut nebo několik dnů. To je ovlivněno zejména teplotou, ale i množstvím přidaného katalyzátoru (látka urychlující chemickou reakci) a urychlovače. Pryskyřice s vysokou tepelnou odolností potřebují vysokou teplotu vytvrzení, naopak pryskyřice s nižší odolností nízkou vytvrzovací teplotu. Teploty vytvrzení mohou být různé, například použitím aminového urychlovače je možné vytvrzovat i při 0 °C.[8]

### 3.1.2 Vinylesterové pryskyřice

Vinylesterové pryskyřice (VE – R), někdy také nazývané jako epoxidové vinylestery nebo vinylestery na epoxidové bázi, se v mnoha směrech liší oproti UP – R. Zejména VE – R na bázi bisfenolu A mají vyšší houževnatost, jsou velmi odolné proti alkalickému prostředí a disponují velkou odolností proti vysokým teplotám avšak za cenu tvarové nestálosti. Zásadně se liší zesíťováním, které na rozdíl od UP – R probíhá pomocí koncových metakrylátových skupin. Tyto pryskyřice jsou podstatně reaktivnější, a vzhledem ke kratším molekulovým řetězcům mají nižší viskozitu a vyšší stupeň zesíťování. Jsou ale zároveň relativně křehké, stejně jako například UP – R na bázi propoxylovaného bisfenolu A. Zpracování je obdobné jako u pryskyřic polyesterových. Jako reaktivní rozpouštědlo se používá styren. Vytvrzení probíhá radikálově pomocí přídavku peroxidu.[8, 17]

VE – R je několik typů rozdělné podle toho, na jaké bázi je pryskyřice vyrobena. Například na bázi bisfenolu A nebo novolaku, kdy se jejich koncové vazby v konečné fázi sesíťují se styrenem. Zvláštním typem jsou velmi kvalitní vinylesteruretany, také na bázi bisfenolu A nebo novolaku. Tedy vinylesteruretanové pryskyřice (VEU – R), známé také pod názvem hybridní vinylesteroratanové, slučují tuhost VE – R s vysokou odolností proti

teplotám ( $T_g = 220\text{ °C}$ ) a vysokou chemickou odolností. Vykazují skvělou vazbu se skleněnými vlákny. Nevýhodou je křehkost, která je ještě výraznější než u VE – R.[8]

Použití VE – R je výrazné, v několika případech vytlačily tyto pryskyřice UP – R a to díky svým vlastnostem, hlavně svou vysokou houževnatostí a chemickou odolností. Také zpracování je snadnější, to kvůli menší viskozitě a lepšímu prosakování vláken. Vzhledem k těmto faktům je spektrum využití poměrně široké. Používají se v oblastech velkého korozního namáhání jako například pro odvod čistého plynu v odsiřovacích zařízeních, pračky, chladicí věže, lodí, atd. Vysoká pevnost se využívá u velkých konstrukcí mostů. Velkou oblastí jejich použití jsou také čistírný odpadních vod.[8]

### 3.1.3 Epoxidové pryskyřice

Epoxidové pryskyřice (EP – R) jsou bezbarvé, mírně nažloutlé a za normální teploty kapalné až pevné látky s neomezenou možností skladování. Jsou definovány jako molekuly s minimálně jednou, většinou však se dvěma epoxidovými skupinami. Tyto skupiny jsou velice reaktivní a to díky epoxidovému kruhu, který se skládá z jednoho kyslíkového a dvou uhlíkových atomů. Tento kruh je velmi napjatý a má snahu se otevřít. EP – R patří mezi velmi hodnotné a drahé reaktoplasty. Mají skvělé mechanické vlastnosti, vysokou rozměrovou stálost a velkou předností je i přilnavost k povrchu, která je důsledkem vznikající polární OH skupiny při polyadici. Poslední zmiňovaná vlastnost se využívá velmi často, používají se v oblastech zalévacích hmot pro elektroniku, na výrobu forem, nástrojů a lepidel nebo na různé povlaky. Další z výhod je relativně malé smrštění během vytvrzování (2 % – 5 % [8]), protože reaguje vždy jedna molekula pryskyřice s jednou molekulou tvrdidla a tak nedochází u většiny možných reakcí k výraznému zvětšení molekuly. To je navíc kompenzováno možností dodání tekuté pryskyřice ještě v počátku reakce, protože k objemovému smrštění dochází z velké části ještě v kapalně fázi. Jednou z nevýhod, kromě jejich vysoké ceny (3 až 4 krát dražší než UP – R), těchto pryskyřic je jejich zpracování. Mají vyšší viskozitu a to zejména při nižších teplotách, proto hůře prosycují vlákna. Avšak byly vynalezeny systémy, které si dokázaly poradit i s tímto problémem. Jsou to systémy hlavně pro laminování velkých konstrukčních dílů.[8, 18]

Podstatně se od UP – R a VE – R liší v průběhu vytvrzování, kde se u těchto zmiňovaných pryskyřic využívá vytvrzování radikálové. U EP – R je reakčním mechanismem polyadice, při které se váže atom tvrdidla na kyslíkový atom epoxidové skupiny. Jelikož polyadice není řetězovou reakcí, tak její průběh je značně pomalejší než u



radikálové řetězové reakce. Jde o pomalou reakci, do níž vstupuje jen pár molekul pryskyřice a tvrdila, reakční časy jsou proto mnohem delší než u UP – R a VE – R. I v tomto případě je možné reakci urychlit, ale pouze v omezeném rozsahu použitím urychlovačů, katalyzátorů a inhibitorů. Často se využívá metoda postupné zvyšování teploty, reakce započne za nižších teplot a postupně se zvyšující se teplotou roste i rychlost vytvrzování pryskyřice.[8, 18]

Epoxidové systémy tvoří velkou škálu materiálů, v současné době se uvádí přes 25 druhů pryskyřic. Takto početnou skupinu tvoří proto, protože jak pryskyřice, tak tvrdidla jsou nejrůznějšími chemickými sloučeninami (aminy, anhydridy kyselin, fenoly). Několik nejpoužívanějších epoxidových pryskyřic a tvrdidel:[8]

- Roztok bromované EP – R – často používaná pro DPS.
- Bisfenol A s aminovým tvrdidlem – velká odolnost proti hydrolyze.
- Bisfenol A s anhydridovým tvrdidlem – standardní systém.
- Cykloalifatická pryskyřice s anhydridovým tvrdidlem – nízkoviskózní systém s vysokou tepelnou odolností.
- Formulovaná EP – R s cykloalifatickým anhydridovým tvrdidlem.
- Formulovaná EP – R s aminovým tvrdidlem.

Bezesporu nejdůležitější jsou EP – R jako bisfenol A a novolaké pryskyřice. Vytvářejí vysoce zesíťovaný polotovar, který má vysokou tvarovou stálost i za vysokých teplot. Další již zmíněné jsou cykloalifatické epoxidy, ty jsou charakteristické nízkou viskozitou a jsou využívány pro venkovní aplikace díky své odolnosti proti UV záření. Obecně vlastnosti jsou ovlivněny hlavně výběrem tvrdidla a samotné pryskyřice, lze tedy podle potřeby dosáhnout velké škály různých vlastností.[8]

#### 3.1.4 Fenolické pryskyřice

Fenolické pryskyřice, jinak také fenoplasty jsou syntetické pryskyřice na bázi fenolů a aldehydů, z nichž se výhradně používají formaldehydy ve formě 30 – 42 % [19] vodného roztoku, vznikající jejich vzájemnou kondenzací. Jsou početnou skupinou reaktivních pryskyřic, vycházející z různých druhů fenolických surovin, různých poměrů fenolu a formaldehydu a chemických nebo fyzikálních modifikací. Vytvrzování probíhá v kyselém nebo alkalickém prostředí při různých teplotách. Pokud reakce probíhá v alkalickém prostředí, pak jsou produkty této reakce označovány jako rezoly. Reakcí

v kyselém prostředí vznikají novolaky. Fenolické pryskyřice se na výrobě klasických vyztužených kompozitů podílejí jen málo. Hlavní využití je v leteckém, železničním a automobilovém průmyslu. V těchto oblastech se využívají převážně díky jejich nehořlavým vlastnostem a příznivému chování při vzniku požáru (produkují kouř s nízkou hustotou a jen malou toxicitou). Dále jsou vysoce tepelně a chemicky odolné a tvarově stálé.[8, 19]

Vytvrzování je komplikovanější a probíhá za několika „stavů“. Nejprve vznikají reakcí fenolů a formaldehydů rezoly nebo novolaky (podle prostředí ve kterém reakce probíhá). Tento „stav“ lze definovat jako výchozí lineární, rezoly a novolaky jsou kapalné nebo pevné, tavitelné a rozpustné. Základní zesíťování probíhá polykondenzační reakcí, při které se odštěpují vedlejší produkty jako čpavek nebo voda v podobě páry. Pak nastává tzv. mezifáze, někdy nazývaná také rezitol, který je ještě tavitelný za tepla, má nízkou mechanickou pevnost, ale již není možné ho rozpustit. Poslední a konečný „stav“ je zcela nerozpustný, netavitelný s vysokou mechanickou pevností a velice odolný chemikáliím. Nevýhodou je jejich křehkost v konstrukčních aplikacích. Řešení je jejich modifikace, kdy se používají deriváty fenolu nebo bisfenolu A. Obecně tedy lze říci, že alkalicky vzniklé rezoly, jejichž charakteristickým znakem je schopnost měnit se působením kyseliny nebo tepla v netavitelnou a nerozpustnou hmotu lze považovat za rezit.[8, 19]

### 3.2 Modifikace a vytvrzování reaktoplastických matric

Modifikacemi je myšleno, přidávání tvrdidel, aditiv a jiných přísad měnících vlastnosti pryskyřice. Je známo mnoho různých přísad, které ovlivňují výsledný výrobek nebo průběh vytvrzovacího procesu, který je mnohdy časově náročný. Proto se například u epoxidových pryskyřic používají urychlovače. V tomto případě nejčastěji BDMA (benzylmethylamin), který se používá v případě, že chceme vytvrzovací proces zkrátit. Dalšími zástupci aditiv mohou být přidávané pigmenty nebo retardéry hoření, které se přidávají za účelem samozhášivosti a omezení šíření požáru.[15, 22]

Vytvrzování reaktoplastických pryskyřic je složitý proces, kdy pryskyřice mění své skupenství z kapalného na pevné, což může probíhat několika způsoby. To záleží hlavně na druhu vytvrzované pryskyřice. Se samotným vytvrzováním je spojeno mnoho faktorů a jsou známé důležité parametry, které je při tomto procesu nutné dodržovat. V první řadě je třeba si přesně definovat čas a teplotu, které hrají při vytvrzení zásadní roli.

Během celého procesu, kdy se z tekuté pryskyřice stává nerozpustný a tuhý kompozit, s některým druhem dispergované fáze, prochází pryskyřice různými stavy.[8]

Proces vytvrzení je také provázen několika zásadními jevy. Za hlavní doprovodný jev lze považovat uvolňování tepla (exotermní reakci). K tomu uvolňování dochází v důsledku tvorby chemických vazeb mezi molekulami výchozího materiálu. Dále pak zvýšení viskozity, kdy se z počátku tekutá pryskyřice postupem času mění na pevnou. V tomto případě rozlišujeme vytvrzování izotermní, probíhá při správném odvádění uvolněného tepla, tehdy viskozita stoupá exponenciálně. A vytvrzování neizotermní, což je opakem, uvolněné teplo není dostatečně odváděno, viskozita nejprve poklesne, následně pak rychle stoupne. A v neposlední řadě také objemové smrštění, ke kterému dochází při přechodu z kapalného do pevného stavu vlivem chemických a fyzikálních změn. To má za následek také zvětšení měrné hmotnosti.[8]

Vytvrzování probíhá většinou dvěma způsoby. Může probíhat pomocí tepla, v tom případě záleží na typu pryskyřice. Některé, zejména reaktoplastické, lze vytvrzovat i za pokojové teploty. Takové vytvrzování je sice časově náročnější, ale je podstatně levnější. Pokud je apelováno na zrychlení procesu, pak je možné vytvrzovat za zvýšené teploty. Druhým způsobem je vytvrzování ultrafialovým (UV) zářením, které se dělí na tři podskupiny:[20]

- UVA – Dlouhovlnné ( $\lambda = 315 \text{ nm} - 400 \text{ nm}$ )
- UVB – Středněvlnné ( $\lambda = 280 \text{ nm} - 315 \text{ nm}$ )
- UVC – Krátkovlnné ( $\lambda < 280 \text{ nm}$ )

UV záření je elektromagnetické záření s kratšími vlnovými délkami než má světlo fialové barvy. Zdrojem záření jsou předměty s vysokou teplotou, například slunce nebo elektrický oblouk. V jisté míře je UV záření pro naše tělo neškodné, například při opalování se projevuje zhnědnutím kůže a pro naše oko je neviditelné.[21]

## 4 Vláknové kompozity s reaktoplastickou maticí

Samotné vlákna se jako konstrukční prvky objevují jen zřídka. Zajímavé vlastnosti mají až ve spojení s přizpůsobivým úložným materiálem, v tomto případě s reaktoplastickou maticí (kapitola 3.1). Úkolem vláken je především absorpce vnějších sil. Vyztužující vlákna mají také větší pevnost, vyšší tuhost a platí, že matrice se nesmí při namáhání porušit dříve než vlákno.[8]

### 4.1 Druhy vyztužujících vláken

V dnešní době existuje mnoho vyztužujících vláken, které lze rozdělit podle druhu materiálu, ze kterých jsou vyrobena na tyto základní:[8, 14]

- Skleněná vlákna (až 80 % výroby kompozitů [14])
- Aramidová vlákna
- Uhlíková vlákna
- Přírodní vlákna

#### 4.1.1 Skleněná vlákna

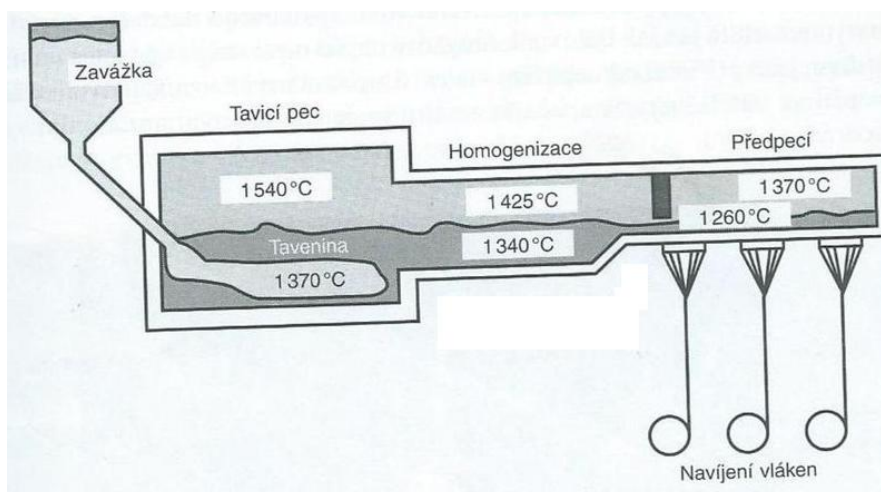
Skleněná vlákna patří mezi nejpoužívanější výztuže v kompozitech. Jejich použití je široké a to díky svým vlastnostem. Mají výborné elektrické a chemické vlastnosti, vynikají vysokou pevností, odolností proti vysokým teplotám a jsou nehořlavé. Základem je  $\text{SiO}_2$  a podle druhu a množství přidaných látek (většinou oxidy kovů – Ca, Al, Pb a Mg) rozlišujeme několik druhů sklovin na výrobu skleněných vláken.[10, 14]

Tím nejnámějším a nejpoužívanějším je tzv. E-sklovina, ze které se vyrábí E-vlákna (elektrická). Tento standardní typ z bezalkalické skloviny je vynikající elektrický izolant, je také vysoce propustný pro záření a nyní ovládá téměř 90 % [8] trhu. Z bezalkalické skloviny jsou také vyrobena AR-vlákna, která se však od E-vláken odlišují svým složením a tak i svými vlastnostmi. Jsou především vysoce odolná proti alkáliím a mimo jiné se používají pro ztužení betonu. Dalším zástupcem je sklovina s vyšším obsahem  $\text{SiO}_2$ , MgO a  $\text{Al}_2\text{O}_3$  označuje se v Evropě jako R-sklovina v USA jako S-sklovina. Její předností je hlavně vyšší pevnost (až o 70 % [8]). Dalším typem je sklovina bezboritá označovaná písmenem C a vyznačuje se vysokou odolností proti kyselinám a proti agresivním látkám. Přehled a složení jednotlivých skel uvádí Tab. 3.[8, 29]

Tab. 3: Složení jednotlivých sklovin (%) [8]

Oxid	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	ZrO <sub>2</sub>	B <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O
<b>E-sklo</b>	54	14-15	-	20-24	-	6-9	-
<b>AR-sklo</b>	62	-	5-9	1-4	17	< 0,5	12-15
<b>C-sklo</b>	60-65	2-6	14	1-3	-	2-7	-
<b>S(R)-sklo</b>	60	25	14	3	-	< 1	-

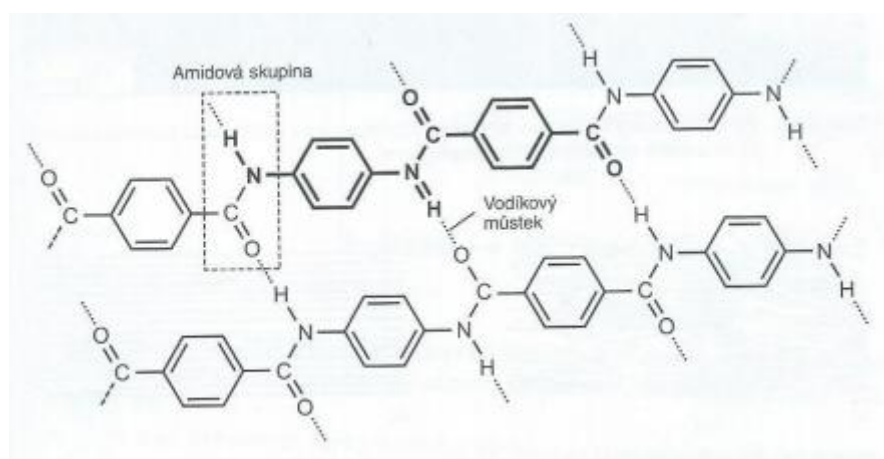
Obr. 2 zobrazuje výrobu skleněných vláken, která spočívá v tažení roztaveného skla z trysek. Roztavení probíhá ve sklářských pecích asi při teplotě 1400 °C [8]. Tyto pece jsou vyzděné žáruvzdornou keramikou a taví se v nich skelný základ, křemičitý písek (SiO<sub>2</sub>) a podle typu skloviny další látky (viz Tab. 3). Roztavená sklovina se několik dní číří. Poté je vedena do spřádacích trysek, které jsou platinové a zahřáté na takovou teplotu, aby z nich sklovina pomalu vytékala a tuhla do tvaru vláken. Trysek bývá 200 až 4 000 [8] a jsou umístěny na spodní straně předpeci. Vlákná na výstupu jsou ještě relativně silná (asi 2mm [8]), proto dochází k jejich prodloužení díky rychle rotujícímu navíjecímu zařízení, které je prodlouží až na 40 000násobnou délku.[8]



Obr. 2: Výroba skleněných vláken tažením z trysek (převzato z: [8])

### 4.1.2 Aramidová vlákna

Aramidová vlákna jsou vlákna na bázi lineárních organických polymerů a jejich kovalentní vazby jsou orientovány podle osy vlákna. Aramidová vlákna můžeme na trhu nalézt v několika formách. Například ve formě pramenců, rohoží nebo tkanin. Aramidová vlákna jsou také vyjímečná díky své hmotnosti, jsou to nejlehčí vyztužující vlákna s hustotou  $\rho = 1,45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Dále patří k jejich přednostem vysoká pevnost a tuhost, což je patrné z Obr. 3.[8, 30]



Obr. 3: Struktura aromatického polyamidu. (převzato z: [8])

Molekuly na obrázku jsou spojovány vazbami vodíkových můstků a nositeli vysoké tuhosti jsou aromatická jádra. Tyto vlákna mají mnoho skvělých vlastností, ale i několik nevýhod. Například jsou silně anizotropní, tzn. vlastnosti měřené ve směru vlákna jsou odlišná od vlastností vláken v příčném směru.[8] Také jsou hydrofilní, absorbují vlhkost (až do 7 % [8]).

Aramidová vlákna se vyrábí i uměle z aromatických polyamidů a typickým představitelem je vlákno s obchodním názvem Kevlar, který dodává od roku 1971 [14] firma DuPont. Kevlar má tu schopnost se plasticky deformovat při působení síly kolmo na vlákna. Dále je houževnatý a odolný vůči abrazi (mechanickému obrušování).[10, 14]

### 4.1.3 Uhlíková vlákna

Uhlíková vlákna vznikají při vysokých teplotách. Výchozí organické vláknité suroviny prochází nejprve karbonizací (tepelná rozklad uhlí za nepřístupu vzduchu), kde dochází k odštěpení téměř všech prvků až na uhlík. S rostoucí teplotou se zvyšuje grafítizace a zlepšují se mechanické vlastnosti. Proces trvá až do doby překročení teploty

nad 1800 °C, kdy je grafitová struktura ukončena, v takovém případě považujeme vlákna za uhlíková. Pokud by teplota překročila 2200 °C, pak by to byla již vlákna grafitová. Rozdíl mezi grafitovým a uhlíkovým vláknem spočívá také v obsahu uhlíku. Do 92 % se jedná o vlákna uhlíková, s vyšším procentem uhlíku to jsou pak vlákna grafitová.[8, 14, 30]

Uhlíková vlákna jsou například oproti skleněným vysoce anizotropní, stejně jako aramidová. Anizotropie ovlivňuje také součinitel teplotní roztažnosti. Měřením lze dokázat rozdílnost v kolmém směru a po směru vláken. Mimo jiné jsou uhlíková vlákna mimořádně odolná vůči korozi, vyznačují se dobrou elektrickou a tepelnou vodivostí. Avšak nevýhodou je křehkost, která je pro ně za normálních podmínek typická. K odstranění této nevýhody se občas používá povrchová úprava apretací, což je směs na bázi epoxidové pryskyřice, která v tomto případě slouží jako ochrana při zpracování a také pro zlepšení vazby vlákno – matrice.[8, 30]

## 5 Experimentální část

Tato část práce se zabývá měřením vybraných typů kompozitních materiálů. Zejména pak měření jejich dielektrických vlastností s využitím dielektrické spektroskopie a fyzikálně-mechanických vlastností jako je například rázová houževnatost a tvrdost nebo měření hustoty.

### 5.1 Měření dielektrických vlastností

Dielektrika, na kterých budou měření probíhat, jsou látky, které mají po vložení do elektrického pole schopnost tvorby a existence vlastního vnitřního elektrického pole. Jsou to tedy látky se schopností se v tomto vnějším poli polarizovat. Dielektrika dělíme mimo jiné podle skupenství, uspořádání a struktury. Používané a účelné je jejich dělení na polární a nepolární. Polárním dielektrikem je myšlena látka obsahující ve svém objemu permanentní elementární dipólové momenty i bez působení vnějšího elektrického pole, nepolární dielektrika tuto schopnost nemají.[11]

Dielektrické vlastnosti obecně charakterizují dielektrikum. Pod pojmem dielektrické vlastnosti se skrývají velice důležité materiálové parametry jako například relativní permitivita ( $\epsilon_r$ ) nebo ztrátový činitel ( $\text{tg } \delta$ ). Toto měření bude zaměřeno na relativní permitivitu, její reálnou a imaginární část a na význam těchto složek. Relativní permitivita je makroskopická veličina, která udává určitou kvantitativní informaci o složitých mikroskopických pochodech odehrávajících se v látce vložené do elektrického pole. Tyto pochody se nazývají polarizace dielektrika a jsou vyvolány působením vnějšího elektrického pole na vázané náboje dielektrika. Projevem polarizace z mikroskopického hlediska je orientace stávajících, nebo vznik nových dipólových momentů.[11, 36]

Měření relativní permitivity probíhalo pomocí širokopásmové dielektrické spektroskopie, někdy také nazývanou relaxační dielektrickou spektroskopií, což je fyzikální metoda založená na sledování komplexní permitivity. Podstatou této metody je měření impedance  $Z^*(\omega)$  látkou vyplněného kondenzátoru, který má v prázdném stavu kapacitu  $C_0$ . V případě deskového kondenzátoru se tato kapacita vypočte podle vztahu (1)

$$C_0 = \epsilon_0 \frac{S}{d}, \quad (1)$$



je-li splněna podmínka  $d^2 \ll S$ , kde  $d$  je vzdálenost a  $S$  je plocha desek. Zanedbáme-li vliv jevů na elektrodách a parazitní impedance, je impedance (poměr proudu ku přiloženému napětí) úměrná poměru intenzity elektrického pole ku proudové hustotě. Při vložení měřené látky bez volného náboje do prostoru kondenzátoru dojde ke zvýšení jeho kapacity, která je úměrná velikosti permitivity. Z výše uvedené změřené impedance při úhlovém kmitočtu  $\omega$  napájecího napětí můžeme určit komplexní kapacitu  $C^*(\omega)$  naplněného kondenzátoru dle vztahu (2):[37]

$$C = \frac{1}{i\omega Z^*(\omega)}. \quad (2)$$

Z této kapacity pak lze vypočítat komplexní relativní permitivitu  $\varepsilon^*(\omega)$  podle (3):[37]

$$\varepsilon^*(\omega) = \varepsilon'(\omega) - i\varepsilon''(\omega) = \frac{C^*(\omega)}{C_0}. \quad (3)$$

K měření byl použit přístroj Novocontrol Alpha-A určený pro širokopásmovou dielektrickou analýzu. K tomuto přístroji byl připojen elektrodový systém ZGS a jednotka pro regulaci teploty Quatro Cryosystem . Využitelný rozsah pracovních teplot činí  $-160^\circ \text{C}$  až  $+400^\circ \text{C}$  . Těchto teplot se dosahuje pomocí dusíkových par.[37]

Měřené vzorky byly v tomto případě dva kompozity. První ze jmenovaných byl kompozitní materiál vyztužený skleněnými vlákny a jako matrice byla použita epoxidová pryskyřice, také známý pod jménem FR4, který je typickým představitelem kompozitu pro desky plošných spojů. Druhý zkušební vzorek byl kompozit se stejnou matricí, ale vyztužený textilními vlákny. Nejprve byly měřené vzorky umístěny do elektrodového systému mezi rovinné válcové elektrody o průměru 30 mm. Došlo tak k vytvoření deskového kondenzátoru. Část elektrodového systému ZGS s vloženým vzorkem znázorňuje Obr. 4. Elektrody s vloženým vzorkem byly zasunuty do komory systému pro regulaci teploty (kryostatu), viz Obr. 5 a mohlo být zahájeno měření.[37]

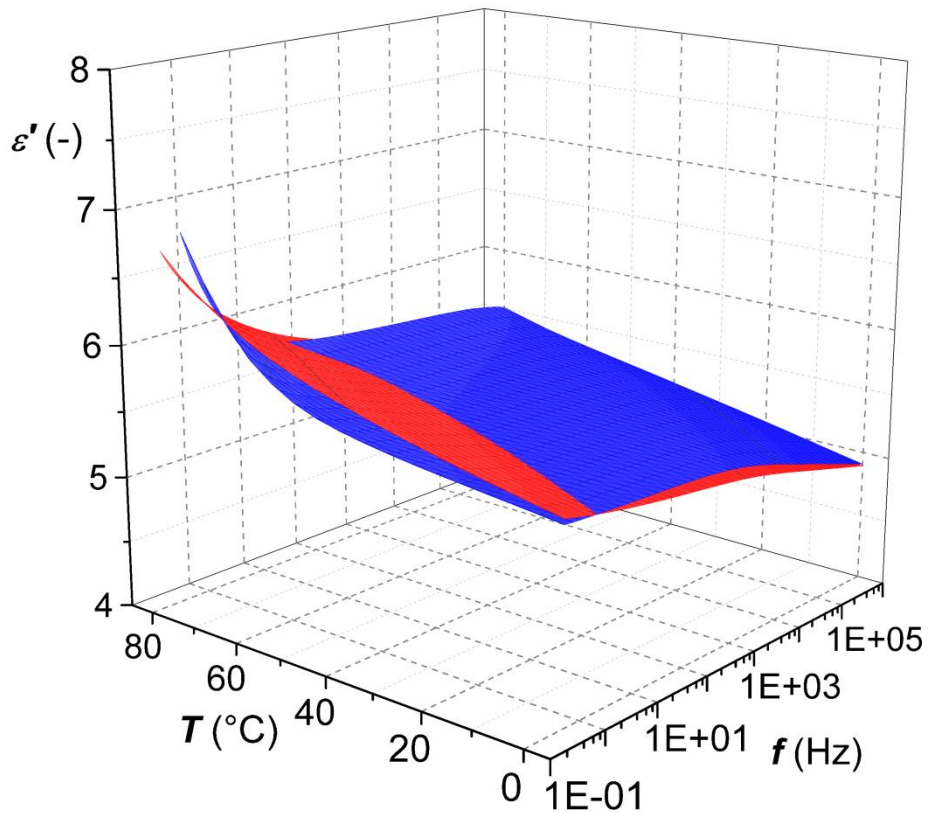


Obr. 4: Rovinné elektrody deskového kondenzátoru

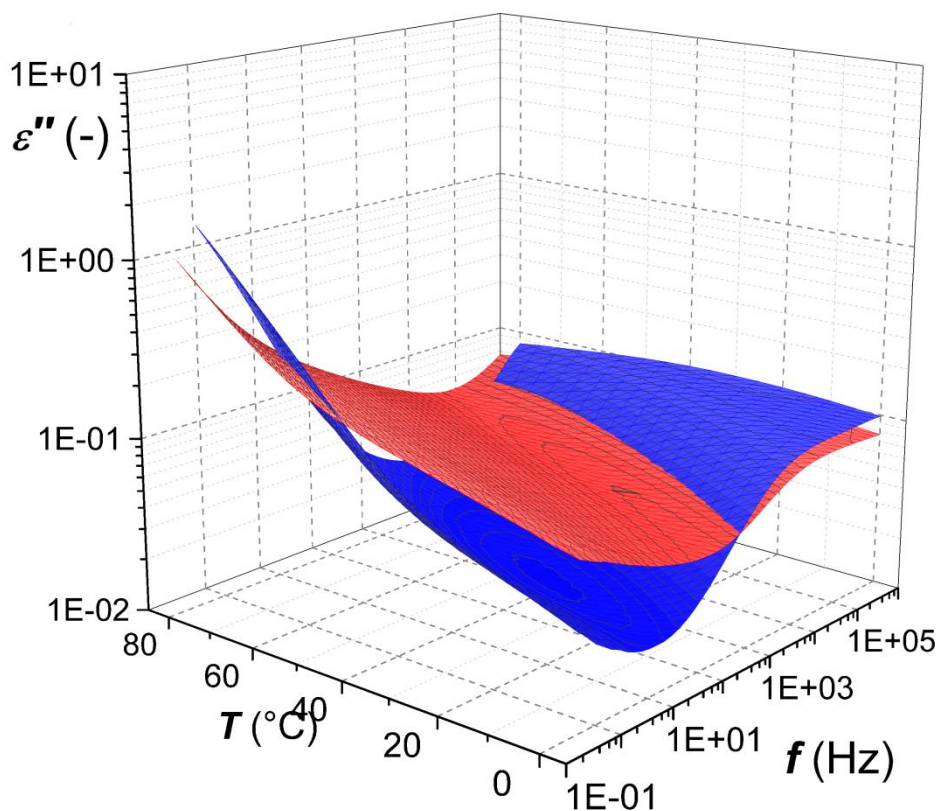


Obr. 5: Kryostat s vysokým rozsahem pracovních teplot

Měření každého vzorku probíhalo v komoře pro regulaci teploty přibližně 1,5 h za pomalu se zvyšující teploty a frekvence. Princip byl takový, že v průběhu měření se stupňovitě zvyšovala teplota, kdy vždy při každé zaznamenané teplotě došlo k proměření celého frekvenčního spektra (0,5Hz – 1Mhz). Frekvence se v průběhu dílčího měření na jedné teplotě snižovala logaritmicky (vždy bylo zaznamenáno 45 hodnot pro jednotlivé frekvence). Poté dojde ke zvýšení teploty, v tomto případě o 5 °C a proces měření při snižující se frekvenci se opakuje. Měření bylo provedeno od teploty 0 °C do 80 °C. Na Obr. 6 a 7 jsou graficky znázorněné výstupy z měření komplexní dielektrické permitivity. Tyto grafy vyobrazují závislost reálné ( $\epsilon'$ ) a imaginární ( $\epsilon''$ ) složky komplexní permitivity na teplotě a frekvenci. Přičemž reálná část, tedy  $\epsilon'$ , je v podstatě mírou kapacity, respektive je úměrná energii, která se v látce vratně nahromadí během jedné periody. Zatímco imaginární část, tedy  $\epsilon''$ , je mírou energie, která se v látce nevratně rozptýlí, lze také říci, že je mírou dielektrických ztrát v materiálu.[37]



Obr. 6: Grafické znázornění závislosti  $\epsilon'$  na teplotě a frekvenci  
Červená – skleněná vlákna, Modrá – textilní vlákna



Obr. 7: Grafické znázornění  $\epsilon''$  na teplotě a frekvenci  
Červená – skleněná vlákna, Modrá – textilní vlákna

## 5.2 Měření fyzikálně-mechanických vlastností

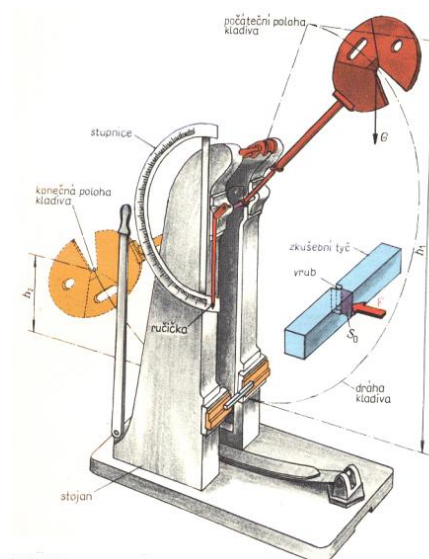
„Mechanickými vlastnostmi je kvantitativně hodnoceno chování materiálu za působení vnějších mechanických sil.“[31] Mezi základní mechanické vlastnosti patří pevnost, pružnost, houževnatost a plasticita. Dále existují vlastnosti jako tvrdost, odolnost proti únavě a tečení, které jsou pouze odvozené od těchto základních vlastností. Mezi fyzikální vlastnosti se řadí například hustota, teplota tavení, délková a objemová roztažnost nebo tepelná a elektrická vodivost. Je velice důležité znát a co nejpřesněji dokázat určit tyto vlastnosti abychom mohli správně a hospodárně využívat technické materiály.[31, 32]

### 5.2.1 Rázová houževnatost

Rázová houževnatost se určuje na základě zkoušky pevnosti v ohybu rázem, což je jedna z běžně využívaných mechanických zkoušek, která je prováděna zpravidla jedním rázem. Tato zkouška slouží ke zjištění, kolik práce (energie) je zapotřebí k přeražení zkušební vzorku. Pro zkoumání pevnosti v ohybu rázem je jednou z metod, která se v praxi využívá díky své jednoduchosti, metoda využívající Charpyho kladivo. Charpyho kladivo představuje měřicí zařízení s kyvadlovým ramenem o různé velikosti a tak i o různé maximální energii, které dokáže svým nárazem vyprodukovat, v tomto případě se jedná o kladivo s maximální energií 6 J. Pokud tato energie dostačuje na přeražení vzorku, tak dojde k zaznamenání hodnoty na stupnici měřícího přístroje. Těžké kladivo, které je otočné kolem své osy, je zdviženo a upevněno ve výchozí pozici, jak lze vidět na Obr. 8. Poté se v nejnižší možné poloze, kterou bude kladivo protínat, umístí zkušební vzorek, v tomto případě je to FR4, který se používá hlavně na DPS. Jedná se o epoxidovou pryskyřici vyztuženou skleněnými vlákny. Jakmile je vzorek na místě, dochází k uvolnění kladiva, které v zápětí narazí na zkušební vzorek, přerazí jej a pokračuje dál do koncové polohy, kde dochází k maximální výchylce ručičky na stupnici. Toto vychýlení je menší než v případě uvolnění kladiva bez vloženého vzorku, protože na přeražení se spotřebovala určitá energie.[31, 32]



Obr. 9: Použité Charpyho kladivo



Obr. 8: Názorný obrázek Charpyho kladiva (převzato z: [32])

Jak je uvedeno výše, pro účel měření bylo využito Charpyho kladivo (Obr. 9) a jako vzorek byl použit kompozitní materiál, který je znám také pod názvem FR4 a představuje jednoho z hlavních zástupců na výrobu desek pro plošné spoje. Měření probíhalo na deseti vzorcích téměř shodných rozměrů, v Tab. 4 je možné vidět jejich průměrnou tloušťku ( $h$ ), šířku ( $b$ ), které byly změřeny pomocí mikrometru na pěti různých místech u každého vzorku, dále průřez ( $S = h \times b$ ) a také délku ( $l$ ), která byla přibližně 120 mm.

Tab. 4: Naměřené rozměry pro testovaný kompozitní materiál FR4 (průměrné hodnoty)

Č. vzorku	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
$h$ [mm]	1,556	1,556	1,556	1,551	1,550	1,553	1,548	1,554	1,550	1,555
$b$ [mm]	9,170	9,263	9,175	9,556	9,271	9,477	9,506	9,291	9,263	9,243
$S$ [mm <sup>2</sup> ]	14,268	14,413	14,276	14,821	14,370	14,717	14,715	14,438	14,357	14,372

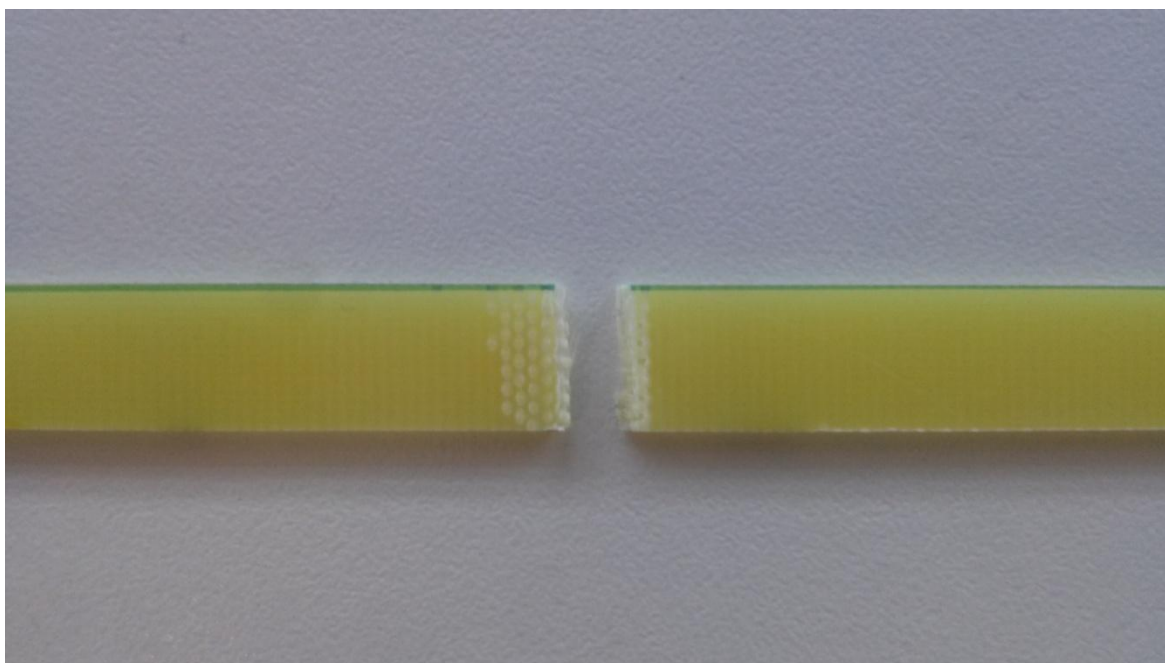
Tab. 5: Naměřené hodnoty energie, vypočítané hodnoty rázové houževnatosti a směrodatných odchylek

Vzorek	1.	2.	3.	4.	5.	6.	7.	8.	9.	10.
$W$ [J]	1,70	1,65	1,60	1,90	1,75	1,80	1,80	1,55	1,65	1,75
$\alpha$ [J·mm <sup>-2</sup> ]	0,1191	0,1145	0,1120	0,1282	0,1218	0,1223	0,1223	0,1074	0,1149	0,1218
$\sigma_a$ [-]	0,0003	0,0020	0,0032	0,0049	0,0017	0,0020	0,0019	0,0055	0,0017	0,0017

V Tab. 5 jsou vidět naměřené hodnoty, respektive velikosti energie ( $W$ ), která byla potřebná k přeražení zkušebního vzorku, střední hodnoty a směrodatné odchylky rázové houževnatosti ( $a$ ). Rázová houževnatost se vypočítá dle vztahu (4):

$$a = \frac{W}{h \times b} [\text{J} \cdot \text{mm}^{-2}]. \quad (4)$$

Měření probíhalo na deseti různých vzorcích s téměř totožnými rozměry, celková průměrná energie je 1,715 J. Přeražení zkušebního vzorku je vyobrazeno na Obr. 10.



Obr. 10: Zkušební vzorek po skončení zkoušky

### 5.2.2 Tvrдост

Měření tvrdosti je dalším představitelem mechanické zkoušky. Je to jedna z nejrychlejších, nejjednodušších a nejlevnějších zkoušek. Je definována jako odpor materiálu proti vnikání cizího tělesa. Z této definice také vychází většina měřících přístrojů. Tvrдост můžeme získat měřením malých vzorků, ale i poměrně rozměrných kusů. Zkoušky tvrdosti lze rozdělit podle rychlosti působení zátěžné síly na statické a dynamické, dále pak podle použité metody na vrypové, vnikací a odrazové.[31, 32]

Měření zkoušky tvrdosti proběhlo v tomto případě na několika vzorcích, které jsou uvedené v Tab. 6.



Tab. 6: Složení vzorků pro měření tvrdosti

Vzorek	Pryskyřice	Výztuž
<i>A</i>	epoxidová	textilní vlákno
<i>B</i>	fenolformaldehydová	textilní vlákno
<i>C</i>	epoxidová	skleněné vlákno

Přístroj pro jedno z několika možných typů měření tvrdosti se nazývá Durometr, nebo také tvrdoměr, a je vyrobený z anodizovaného hliníku a nerezové oceli. Jeho součástí je také ukazatel maximální tvrdosti a otáčivá odstupňovaná stupnice. V případě tohoto měření byl využit tvrdoměr se stupnicí Shore D pro materiály jako polyester, nylon, akryl nebo kevlar. Tento typ Durometru lze využít s několika normami, v případě tohoto měření byla použita norma ASTM D 2240. Vzorky byly jeden po druhém vloženy na pevnou desku přístroje pro měření tvrdosti, který je vyobrazen na Obr. 11.[33]



Obr. 11: Durometr Shore D

Následně dochází k průniku hrotu pod tlakem pružiny do měřeného materiálu pod proměnlivou silou závislou na modelu přístroje. Údaj je potom zobrazený na kruhové stupnici cejchované od 0 do 100 Shorových jednotek tvrdosti. V Tab. 7 jsou uvedeny naměřené hodnoty tvrdosti pro tři různé kompozitní materiály, které jsou zanesené

v tabulce výše. Měření probíhalo kvůli přesnosti na pěti různých místech u každého ze vzorků. Z naměřených hodnot lze vidět podobnost u materiálů vyztužených textilním vláknem, naproti tomu přibližně o 3 větší tvrdost vykazuje kompozitní materiál známý také pod názvem FR4, který je vyztužený skleněnými vlákny.[34]

Tab. 7: Naměřené hodnoty tvrdosti

Vzorek	Dílčí měření tvrdosti					Průměrná tvrdost [-]
	1.	2.	3.	4.	5.	
<b>A</b>	85	87	87	87,5	88	86,9
<b>B</b>	85	87	87	87,5	85,5	86,4
<b>C</b>	88	90,5	90	89	88	89,1

### 5.2.3 Hustota

Hustota je fyzikální veličina a je obecně dána poměrem hmotnosti a objemu za určité teploty. V případě provedení měření hydrostatickou metodou je však třeba uvést vztah vycházející z Archimedova zákona ve tvaru (5):

$$\rho = \frac{m_1}{(m_1 - m_2)} \times \rho_1 \text{ [g} \cdot \text{cm}^{-3}\text{]}. \quad (5)$$

Toto měření hustoty se provádí pomocí vah. Určením rozdílu hmotnosti měřeného materiálu ve vzduchu ( $m_1$ ) a hmotnosti materiálu ponořeného ve známé kapalině ( $m_2$ ). Pokud známe obě hmotnosti a zároveň hustotu kapaliny ( $\rho_1$ ), v tomto případě Isoproylalkoholu, pak můžeme pomocí předchozího vztahu vypočítat hustotu měřeného vzorku.[32]

Při měření hustoty v rámci této práce byly využity laboratorní váhy RADWAG XA/R2, který je možné vidět na Obr. 12. Pro účel měření byly použity vzorky strukturně stejné jako v předešlém měření tvrdosti. Rozdílem jsou v tomto případě pouze rozměry měřených vzorků, které jsou 15 mm x 15 mm.





Obr. 12: RADWAG XA/R2 (převzato z: [35])

Prvním krokem bylo změření hmotnosti vzorku ve vzduchu ( $m_1$ ). V druhém kroku byl vzorek zcela ponořený na misce vah do kádinky, která byla naplněná kapalinou, a byla změřena hmotnost vzorku v kapalině ( $m_2$ ). Použitá kapalina byl Isopropylalkohol s hustotou  $\rho = 0,786 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ . Tato kapalina byla použita díky své malé hustotě hlavně proto, aby byl měřený vzorek schopen se zcela potopit. Na základě hodnot hmotností  $m_1$  a  $m_2$  a hustoty Isopropylalkoholu provedla použitá váha automatický výpočet hustoty vzorku s přesností na čtyři desetinná místa. Takto bylo měření provedeno ještě dvakrát pro zbylé dva vzorky. Naměřené hodnoty hustot zobrazuje Tab. 8.

Tab. 8: Výsledky měření hustoty

Vzorek	$m_1$ [g]	$m_2$ [g]	$\rho$ [ $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ]
A	0,3033	0,1656	1,7315
B	0,5780	0,2350	1,3248
C	0,5928	0,3563	1,9706

## Závěr

Cílem této bakalářské práce bylo podání stručného přehledu o kompozitních materiálech, o jejich dělení podle matrice a výztuže. Matrice zde slouží ve funkci pojiva výztuže a je poddajnější, zatímco výztuž je pevnější, tvrdší a slouží jako nosná složka. Kompozity se v elektrotechnické praxi využívají čím dál častěji hlavně jako izolace elektrických strojů a přístrojů, kde se klade čím dál tím větší důraz na spolehlivost. Jednou z cest, jak spolehlivost zařízení zvýšit, je zlepšení právě izolačního systému.

V další fázi práce byl kladen důraz pouze na dvoufázové kompozitní materiály s reaktoplastickou matricí a na jejich aplikaci v elektroizolačních systémech. Jejich využití je široké, proto je v tomto případě zmíněno jejich nejběžnější použití, s kterým se lze v praxi setkat. Například jsou nedílnou součástí pro výrobu desek pro plošné spoje, kde tvoří nosnou část pro montáž součástek. Nacházejí své uplatnění také na výrobu izolátorů nebo v izolačních systémech točivých strojů. Následně byla provedena rešerše polymerních matric používaných pro výrobu dvoufázových kompozitů a také materiálů pro dispergovanou fázi. Mezi nejpoužívanější reaktoplastické matrice patří především epoxidové, polyesterové nebo vinylové pryskyřice. V případě dispergované fáze, respektive výztuže, je tato práce zaměřena na vláknové struktury a jejich výrobu a formování. Mezi nejpoužívanější vlákna patří skleněná, která se vyrábějí tažením z trysek. Dalšími zástupci dispergované fáze vláknové struktury jsou vlákna aramidová, uhlíková nebo přírodní (textilní).

V experimentální části bylo změřeno několik vlastností vybraných vzorků. Z dielektrických vlastností byly zjištěny hodnoty reálné a imaginární relativní permitivity v závislosti na teplotě a frekvenci. Výsledky byly zaznamenány v 3D grafech. Následovalo měření fyzikálně-mechanických vlastností. V měření pevnosti v ohybu rázem byly zjištěny jednotlivé energie potřebné k přeražení zkušebního vzorku a následně vypočtena rázová houževnatost. V měření tvrdosti byla prokázána nejvyšší tvrdost u kompozitu FR4 (epoxidová pryskyřice vyztužená skleněným vláknem). Nakonec byla změřena hustota, která se ukázala nejvyšší u kompozitu nesoucí název FR4.

## Seznam literatury a informačních zdrojů

- [1] SKÁLOVÁ, J., MOTYČKA V., KOUTSKÝ J. *Nauka o materiálech*. 2. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2000. ISBN 80-7082-677-0.
- [2] KUČEROVÁ, E. *Elektrotechnické materiály*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2002. ISBN 80-7082-940-0.
- [3] DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich užití*. Vyd. 1. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2007. ISBN 978-80-7372-279-1.
- [4] *Keramické kompozity a funkčně gradované materiály*, Vysoká škola chemicko-technologická v Praze. [online]. [cit. 2016-04-18]. Dostupné z: [http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic\\_Technology/SM-Lect-10-C.pdf](http://old.vscht.cz/sil/keramika/Ceramic_Technology/SM-Lect-10-C.pdf)
- [5] CARDARELLI, F. *Materials handbook: a concise desktop reference*. 2nd ed. London: Springer, c2008. ISBN 1846286689.
- [6] SKÁLOVÁ, J. *Nauka o materiálech*. 1. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 1999. ISBN 80-7082-501-4.
- [7] DUCHÁČEK, V. *Polymery: výroba, vlastnosti, zpracování, použití*. Vyd. 3., přeprac. Praha: Vysoká škola chemicko-technologická v Praze, 2011, 276 s. ISBN 978-80-7080-788-0.
- [8] EHRENSTEIN, G. W. *Polymerní kompozitní materiály*. V ČR 1. vyd. Praha: Scientia, 2009. ISBN 978-80-86960-29-6.
- [9] PTÁČEK, L. *Nauka o materiálu II*. 2. opr. a rozš. vyd. Brno: CERM, 2002. ISBN 80-7204-248-3.
- [10] TOMÁŠKOVÁ, T. *Perspektivní kompozity pro elektrotechniku*. Plzeň, 2012. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Doc. Ing. Eva Kučerová, CSc.
- [11] MENTLÍK, V. *Dielektrické prvky a systémy*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. ISBN 80-7300-189-6.
- [12] BAREŠ, R. *Kompozitní materiály*. Vyd. 1. Praha: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1988, 325 s.
- [13] Styren - *Arnika.org* [online]. [cit. 2016-04-22]. Dostupné z: <http://arnika.org/styren>
- [14] JANDERA, T. *Diagnostický systém kompozitních materiálů*. Plzeň, 2015. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Vedoucí práce Prof. Ing. Václav Mentlík, CSc.
- [15] KOŘÍNEK, Z. *Kompozity* [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.volny.cz/zkorinek/>
- [16] *Kopolymerace*. [online]. [cit. 2016-04-28]. Dostupné z: <http://www.bioorganickachemiesite.upol.cz/site/wp-content/uploads/2014/01/03MMCi.pdf>
- [17] JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [18] LIDARŮ, M. *Epoxidové pryskyřice*. 3., přeprac. a rozš. vyd. Praha: SNTL, 1983. Makromolekulární látky.
- [19] LEDERER J. *Fenoplasty* [online]. [cit. 2016-05-4]. Dostupné z: [http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/FENOPLASTY\\_.pdf](http://chemistry.ujep.cz/userfiles/files/FENOPLASTY_.pdf)
- [20] SKALICKÁ F. Z., HON Z., NAVRÁTIL L. *Biologické účinky ultrafialového záření*, Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích. 2010. [online]. [cit. 2016-05-17]. Dostupné z: <http://casopis-zsfju.zsf.jcu.cz/kontakt/administrace/clankyfile/20120423193117779150.pdf>
- [21] *Ultrafialové záření*. [online]. [cit. 2016-09-19]. Dostupné z :

- <http://fyzika.jreichl.com>.
- [22] Kompozity. [online]. [cit. 2017-03-06]. Dostupné z : <http://www.gdpkoral.cz>
- [23] Elektroizolanty. [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z:  
<http://www.elektroizolanty.cz/>
- [24] Elektro izolanty. [online]. [cit. 2017-03-07]. Dostupné z:  
<http://www.swt.sk/katalog/plasty/dosky/elektro-izolanty.html>
- [25] Přehled základních plátovaných materiálů na výrobu DPS. [online]. [cit. 2017-03-09]. Dostupné z: <http://www.dps-az.cz/vyroba/id:7333/prehled-zakladnych-platovanych-materialov-na-vyrobu-dps>
- [26] Elektrické a kombinované stárnutí elektroizolačních materiálů. [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: <https://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/394/1/r0c1c2.pdf>
- [27] Flame retardants in printed circuit boards. [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z: [https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/pcb\\_ch2.pdf](https://www.epa.gov/sites/production/files/2015-08/documents/pcb_ch2.pdf)
- [28] Korek jako výplňový materiál v kompozitních sendvičových konstrukcích. [online]. [cit. 2017-05-02]. Dostupné z:  
[http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24543/%C5%A1ediv%C3%BD\\_2013\\_dp.pdf?sequence=1](http://digilib.k.utb.cz/bitstream/handle/10563/24543/%C5%A1ediv%C3%BD_2013_dp.pdf?sequence=1)
- [29] D. R. ASKELAND a P. P. FULAY. *Essentials of materials science and engineering*. 2. vyd., SI ed. United States: Cengage Learning, 2010, xx, 604 s. ISBN 978-049-5438-502.
- [30] K. KAW. *Mechanics of composite materials*. 2. vyd. Boca Raton, FL: CRC Press, 2006, 466 s. Mechanical engineering series, v. 29. ISBN 978-084-9313-431.
- [31] JANOVEC J., CEJP J., *Nauka o materiálu, České vysoké učení technické v Praze*. [online]. [cit. 15-5-2017]. Dostupné z: [http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3\\_2\\_\\_struktura-a-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf](http://umi.fs.cvut.cz/wp-content/uploads/2014/08/3_2__struktura-a-vlastnosti-materialu-a-jejich-zkouseni.pdf)
- [32] DRIML, B., *Základní vlastnosti materiálu a jejich zkoušení*, Univerzita Palackého v Olomouci. [online]. [cit. 15-5-2017]. Dostupné z:  
[http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky\\_mat.pdf](http://chemikalie.upol.cz/skripta/mvm/zkousky_mat.pdf)
- [33] Elcometer Shore Durometr D, technický list. [online]. [cit. 16-5-2017]. Dostupné z: [https://www.gamin.cz/fileadmin/user\\_upload/Elcometer\\_3120.pdf](https://www.gamin.cz/fileadmin/user_upload/Elcometer_3120.pdf)
- [34] Analogový Durometr Shore. [online]. [cit. 16-5-2017]. Dostupné z:  
<http://www.merenivrdosti.cz/analogovy-durometr-shore-a-ld0550.html>
- [35] Laboratorní váhy RADWAG [online]. [cit. 30-5-2017]. Dostupné z:  
<http://www.vahy-radwag.cz/Laboratorni-vahy/Analyticke-vahy-104/XA-R2-204>
- [36] Dielektrické vlastnosti tuhých látek [online]. [cit. 31-5-2017]. Dostupné z:  
[http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab\\_soubory/uloha\\_4.pdf](http://martin.feld.cvut.cz/~koblizek/X13MTV-lab_soubory/uloha_4.pdf)
- [37] NEUBERT, M. *Relaxační, zejména dielektrické chování polymerních kompozitů a kapalně krystalických polymerů*. Praha, 2016. Disertační práce. Matematicko-fyzikální fakulta, Univerzita Karlova v Praze. Vedoucí práce Doc. RNDr. Jan Nedbal, CSc.